

⑯ BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT

⑯ Offenlegungsschrift
⑯ DE 101 62 379 A 1

⑯ Int. Cl.⁷:
B 23 K 26/38

(3)

⑯ Aktenzeichen: 101 62 379.8
⑯ Anmeldetag: 19. 12. 2001
⑯ Offenlegungstag: 17. 7. 2003

⑯ Anmelder:
Wetzel GmbH, 79639 Grenzach-Wyhlen, DE

⑯ Erfinder:
Granse, Gerolf, 79689 Maulburg, DE

⑯ Entgegenhaltungen:

DE 199 05 571 C1
DE 100 54 853 A1
DE 40 21 407 A1
US 52 23 692 A
US 44 61 947
US 41 69 976

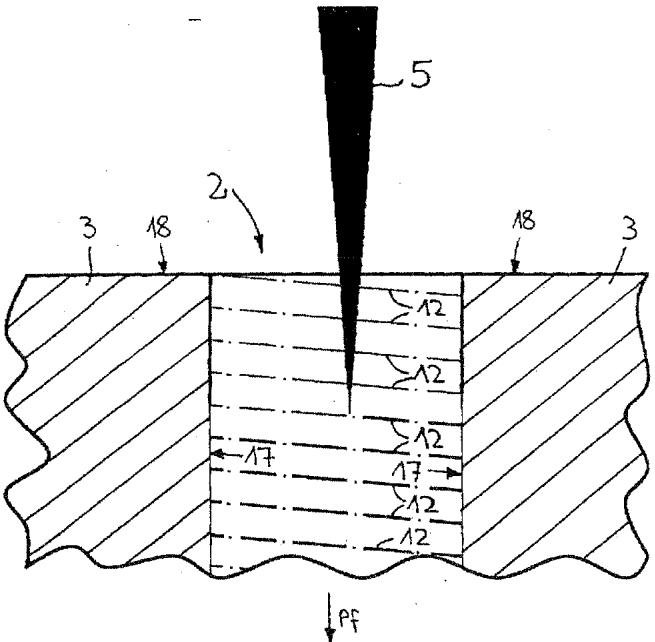
DAUSINGER,F,[u.a.]: Bohren keramischer
Werkstoffe
mit Kurzpuls-Festkörperlasern. In: LaserOpto,1999
, H.3, S.78-85;

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑯ Verfahren zum Herstellen einer Mikrobohrung

⑯ Bei einem Verfahren zum Herstellen einer Mikrobohrung wird ein Laserstrahl im Bereich eines Werkstücks fokussiert. Zum Abtragen von innerhalb einer zu erzeugenden Bohrlochkontur befindlichem Werkstückmaterial werden der Fokuspunkt relativ zueinander bewegt. Dabei läuft der Fokuspunkt innerhalb der Bohrlochkontur oder deren gerader Verlängerung um, wobei er zusätzlich in und/oder entgegen der Durchtrittsrichtung der zu erzeugenden Mikrobohrung relativ zu dem Werkstück bewegt wird.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Herstellen einer Mikrobohrung, wobei ein Laserstrahl im Bereich eines Werkstücks fokussiert und der Fokuspunkt zum Abtragen von innerhalb einer zu erzeugenden Bohrlochkontur oder deren gerader Verlängerung umlaufend bewegt wird.

[0002] Ein derartiges Verfahren ist aus US 6 057 525 bekannt. Dabei wird ein Laserstrahl über einen in zwei quer zueinander verlaufenden Richtungen verschwenkbaren X-Y-Ablenkspiegel geleitet und anschließend mittels einer Fokussierlinse fokussiert. Zum Erzeugen einer kreisförmigen Umlaufbewegung des Fokuspunkts werden die Antriebe für die X- und Y-Achse des Ablenkspiegels mit zwei um 90° phasenverschobenen sinusförmigen Steuersignalen angesteuert. Mittels einer Positioniereinrichtung wird der Fokuspunkt zum Abtragen von innerhalb der zu erzeugenden Bohrlochkontur befindlichem Werkstückmaterial vor Beginn des Materialabtrags im Bereich des Werkstücks positioniert, wobei die Fokuslage sowohl in Abhängigkeit von dem Material des Werkstücks als auch in Abhängigkeit von der jeweiligen Anwendung gewählt wird.

[0003] Um an den Stirnseiten des Bohrlochs im Bereich der Bohrlochränder Kondensat und dergleichen Ablagerungen zu vermeiden ist sowohl die dem Laserstrahl zugewandte Vorderseite auch die gegenüberliegende Rückseite des Werkstücks jeweils während der Materialbearbeitung mit einer Abdeckplatte abgedeckt. Die Abdeckplatten werden mittels einer Halterung in ihrer Lage relativ zu dem Werkstück fixiert. Während des Materialabtrags kondensiert der an der Bearbeitungsstelle des Werkstücks verdampfende Werkstoff und schlägt sich auf den Abdeckplatten nieder. Nach Fertigstellung des Bohrlochs werden die Abdeckplatten entfernt. Das Verfahren ermöglicht zwar die Herstellung von Mikrobohrungen, die an ihren Stirnseiten weitgehend frei von Bearbeitungsrückständen sind, jedoch ist das Verfahren noch relativ aufwendig. Vor allem bei Werkstücken die an ihrer Vorder- und/oder Rückseite einen von einer Ebene abweichenden Verlauf aufweisen oder bei denen die Stelle, an der die Mikrobohrung in der das Werkstück eingebracht werden soll, nur schlecht zugänglich ist, ist das Abdecken des Werkstücks mit den Abdeckplatten schwierig und umständlich. Ungünstig ist außerdem, dass die mit dem vorbekannten Verfahren hergestellten Bohrlöchern nur eine relativ geringe Qualität aufweisen, insbesondere weil die Abmessungen der Mikrobohrung von den gewünschten Abmessungen abweichen können.

[0004] Es besteht deshalb die Aufgabe, ein Verfahren der eingangs genannten Art zu schaffen, dass auf einfache Weise die Herstellung von Mikrobohrungen mit hoher Maßgenauigkeit und Qualität ermöglicht.

[0005] Diese Aufgabe wird bei einem Verfahren der eingangs genannten Art dadurch gelöst, dass der Fokuspunkt und das Werkstück während des Materialabtrags zusätzlich zu der Umlaufbewegung in und/oder entgegen der Durchtrittsrichtung der zu erzeugenden Mikrobohrung relativ zueinander bewegt werden.

[0006] Der Fokuspunkt wird also während der Materialbearbeitung außer in Umfangsrichtung auch noch in Längs- oder Z-Richtung der Mikrobohrung und somit dreidimensional relativ zu dem Werkstück positioniert. Dabei erfolgt diese dreidimensionale Positionierung des Fokuspunkts bei tiefen Mikrobohrungen vorzugsweise nur über einen Teil der Länge bzw. Tiefe der Mikrobohrung. So kann beispielsweise bei einer Mikrobohrung mit einer Tiefe von etwa einem Millimeter die Verstellung der Z-Lage des Fokus etwa 350 bis 500 Mikrometer betragen. Vor allem bei Werkstücken mit geringer Dicke kann die dreidimensionale Positio-

nierung des Fokuspunkts aber auch über die gesamte Länge der herzustellenden Mikrobohrung erfolgen. In vorteilhafter Weise wird dadurch im Bereich der stirnseitigen Ränder der Mikrobohrung jeweils eine hohe Oberflächenqualität des Werkstücks ermöglicht, wobei die Umgrenzungsränder der Mikrobohrung weitgehend frei von Kondensat und dergleichen Rückständen bleiben. Die Bohrungsinnenwand weist nur eine sehr geringe rissarme bis rissfreie Schmelzphase auf. Das Verfahren ermöglicht somit die Herstellung von Mikrobohrungen mit hoher Qualität und Maßgenauigkeit, insbesondere im Bohrungsein- und austrittsbereich. Somit kann der Aufwand für eine Nachbearbeitung der Mikrobohrung wesentlich reduziert oder sogar eingespart werden. Das Verfahren ist vor allem zur Herstellung von Mikrobohrungen mit Querschnittsabmessungen von 80 mit 300 Mikrometern mit nahezu beliebigen Querschnitt, also zum Beispiel mit Rund- oder Freiformquerschnitt, in Stählen oder dergleichen Metallen sowie in Keramiken, wie zum Beispiel Al_2O_3 , geeignet. Das Verfahren wird bevorzugt zur Herstellung von durchflussbestimmenden Durchgangsbohrungen, wie zum Beispiel Spinndüsenbohrungen verwendet. Das Verfahren ist nicht auf bestimmte Materialien oder Laser bzw. Laserparameter, wie z. B. Wellenlänge, Pulsdauer, Strahlenergie und/oder Repetitionsrate beschränkt.

[0007] Bei einer vorteilhaften Ausführungsform der Erfindung wird der Fokuspunkt während des Materialabtrags entlang einer schraubenlinienförmigen Bahnkurve bewegt. Das Verfahren ist dann besonders einfach durchführbar.

[0008] Bei einer Ausführungsform der Erfindung wird die in Durchtrittsrichtung der zu erzeugenden Mikrobohrung weisende Geschwindigkeitskomponente der Relativgeschwindigkeit zwischen Fokuspunkt und Werkstück zumindest in einem Abschnitt der zu erzeugenden Mikrobohrung konstant gehalten. In einen homogenen Werkstoffen ergibt sich dann eine gleichmäßige Oberflächenqualität der Innenwand der Mikrobohrung.

[0009] Bei einer anderen Ausführungsform der Erfindung wird die in Durchtrittsrichtung der zu erzeugenden Mikrobohrung weisende Geschwindigkeitskomponente der Relativgeschwindigkeit zwischen Fokuspunkt und Werkstück in Abhängigkeit von dem Bohrfortschritt verändert, und insbesondere in einem Anfangs- und/oder Endabschnitt der zu erzeugenden Mikrobohrung kleiner gewählt als in einem dazwischen befindlichen Abschnitt der Mikrobohrung. Dadurch kann am Anfang der Mikrobohrung, wenn der Laserstrahl auf eine noch unbearbeitete, einen relativ hohen Reflexionsgrad aufweisende Werkstückoberfläche auftrifft, durch die dort reduzierte Bahngeschwindigkeit des Fokuspunkt eine größere Leistung in das Werkstück eingekoppelt werden, um die dann noch erhöhten Abstrahlverluste auszugleichen. Durch Reduzierung der Bahngeschwindigkeit am Ende der Mikrobohrung können die bei Durchtritt des Laserstrahls durch den bereits fertiggestellten Abschnitt der Bohrung und der sich darin ausbildenden Dampfkapilare auftretenden Verluste im Laserstrahl ausgeglichen werden.

[0010] Bei einer besonders vorteilhaften Ausführungsform der Erfindung ist vorgesehen, dass der Durchmesser oder wenigstens eine Querschnittsabmessung der Umlaufbewegung des Fokuspunkts in Abhängigkeit von dem Bohrfortschritt verändert wird und dass vorzugsweise in einem Anfangsabschnitt der Mikrobohrung der Durchmesser oder die wenigstens eine Querschnittsabmessung kleiner gewählt wird als in einem sich an den Anfangsabschnitt anschließenden Abschnitt der Mikrobohrung. Dadurch kann an der strahleinfallseitigen Stirnseite der Mikrobohrung die Gefahr der Ablagerung von Rückständen zusätzlich reduziert werden, wodurch eine noch bessere Maßgenauigkeit und somit eine entsprechend hohe Qualität der Mikrobohrung erreicht

60

wird.

[0011] Die Herstellung einer Mikrobohrung, die wenigstens einen trichter- oder konusförmig sich in Strahlausbreitungsrichtung verjüngenden Bohrlochabschnitt aufweist, kann dadurch erreicht werden, dass der Durchmesser oder wenigstens eine Querschnittsabmessung der Umlaufbewegung des Fokuspunkts in einem vorzugsweise am Anfang der zu erzeugenden Mikrobohrung angeordneten Bohrlochabschnitt mit zunehmendem Bohrfortschritt reduziert wird, vorzugsweise derart, dass die Bahnkurve entlang welcher der Fokuspunkt bewegt wird, in einer trichter- oder konusförmigen Fläche verläuft. Dabei kann ein solcher trichter- oder konusförmiger Bohrlochabschnitt auch einen von einer Kreisform abweichenden, nahezu beliebigen Querschnitt aufweisen. Gegebenenfalls ist es sogar möglich, dass sich der trichter- oder konusförmige Wandungsabschnitt in Umfangsrichtung nur über einen Teil der Wandung der Bohrung erstreckt.

[0012] Bei einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung ist vorgesehen, dass die zu erzeugende Kontur der Mikrobohrung im wesentlichen in einem Schrapp-Bearbeitungsschritt hergestellt wird, das danach in einem Schlicht-Bearbeitungsschritt die Wandung der Mikrobohrung geglättet wird, und das in dem Schlicht-Bearbeitungsschritt die Relativgeschwindigkeit zwischen Fokuspunkt und Werkstück vorzugsweise größer gewählt wird als in dem Schrapp-Bearbeitungsschritt. Dabei ist die Relativgeschwindigkeit in dem Schlicht-Bearbeitungsschritt vorzugsweise fünf bis zehn Mal so hoch wie die Relativgeschwindigkeit in dem Schrapp-Bearbeitungsschritt. Dadurch kann trotz einer geringen Bearbeitungsdauer eine rissarme Bohrlochwand mit hoher Innenwand-Qualität erreicht werden.

[0013] Vorteilhaft ist, wenn in dem Schlicht-Bearbeitungsschritt der Drehssinn der Umlaufbewegung des Fokuspunkts entgegengesetzt zum Drehsinn der Umlaufbewegung bei dem Schrapp-Bearbeitungsschritt gewählt wird. Dadurch kann eine noch glattere Innenwand der Mikrobohrung erzeugt werden.

[0014] Bei einer vorteilhaften Ausführungsform der Erfindung ist vorgesehen, dass der Fokuspunkt zu Beginn der Bearbeitung innerhalb der zu erzeugenden Bohrlochkontur oder deren gerader Verlängerung mit seitlichem Abstand dazu vorzugsweise etwa mittig zu der zu erzeugenden Mikrobohrung positioniert wird, bis Material von dem Werkstück abgetragen wird, dass danach der seitliche Abstand zwischen der Bohrlochkontur oder deren gerader Verlängerung durch eine Relativbewegung zwischen Fokuspunkt und Werkstück reduziert wird und dass dann die zu erzeugende Bohrlochkontur im wesentlichen hergestellt wird. Durch diese Maßnahme wird an der Stirnseite der Mikrobohrung eine noch rückstandsfreie Werkstückoberfläche erreicht. Außerdem wird die Wärmeinkopplung in das Material der späteren Innenwand der Mikrobohrung und somit die Gefahr einer Rissbildung in der Innenwand reduziert.

[0015] Vorteilhaft ist, wenn der Laserstrahl zum Erzeugen der Umlaufbewegung des Fokuspunkts quer zu seiner Längserstreckung parallel verschoben wird und dabei vorzugsweise etwa rechtwinklig zur strahleinfallseitigen Oberfläche des Werkstücks auf dieses auftrifft. Ein rechtwinkliger Strahleinfall kann beispielsweise durch Verwendung einer telezentrischen Optik erreicht werden. Der Laserstrahl kann aber auch bei schrägem Auftreffen auf die strahleinfallseitige Oberfläche des Werkstücks quer zu seiner Längserstreckung parallel verschoben werden, beispielsweise bei Verwendung einer $f\text{-}\theta$ -Optik.

[0016] Zum Herstellen konturenscharfer Bohrlöcher mit von einer Kreisform abweichendem Querschnitt ist es vorteilhaft, wenn bei einer Schrappbearbeitung wenigstens

zwei seitlich aneinander angrenzende oder sich seitlich bereichsweise überdeckende Teilbohrlöcher in das Werkstück eingebracht werden, und wenn dazu jeweils der Fokuspunkt innerhalb der Bohrlochkontur des zu betreffenden, zu erzeugenden Teilbohrlochs oder dessen gerader Verlängerung umlaufend und zusätzlich in und/oder entgegen der Durchtrittsrichtung des zu erzeugenden Teilbohrlochs relativ zueinander bewegt werden. Bei einem sich anschließenden Schlichtbearbeitungsschritt wird der Fokuspunkt dagegen vorzugsweise entlang der gesamten Kontur der zu erzeugenden Mikrobohrung bewegt.

[0017] Vorteilhaft ist, wenn die Strahlleistung des Laserstrahls in Abhängigkeit von dem Bohrfortschritt verändert wird und wenn vorzugsweise in einem Anfangs- und/oder Endabschnitt der zu erzeugenden Mikrobohrung eine größere Strahlleistung gewählt wird als in einem dazwischen befindlichen Abschnitt der Mikrobohrung. Auch dadurch können die zu Beginn des Bohrungsvorgangs an der noch unbearbeiteten Werkstückoberfläche auftretenden Abstrahlverluste sowie die beim Abtragen von Werkstückmaterial am Ende der Mikrobohrung in dieser auftretenden Streuverluste des Laserstrahls kompensiert werden.

[0018] Eine gute Energieeinkopplung in das abzutragende Bohrlochmaterial kann auch dadurch erreicht werden, dass der Laserstrahl im wesentlichen in einer Ebene polarisiert ist, und dass Lage dieser Polarisationsebene relativ zu dem Werkstück entlang der Bahnkurve des Fokuspunkts verändert wird, vorzugsweise derart, dass die Polarisationsebene jeweils etwa rechtwinklig zur Tangente an die Bahnkurve in der jeweiligen Bearbeitungsstelle verläuft. Bei einer vorteilhaften Ausführungsform der Erfindung wird im Bereich der zu erzeugenden Mikrobohrung während des Materialabtrags von dem Werkstück ein Hilfsgasstrom vorzugsweise quer zur Durchtrittsöffnung der zu erzeugenden Mikrobohrung zugeführt. Dabei wird der Hilfsgasstrom bevorzugt parallel zur Werkstückoberfläche geführt, wobei der Hilfsgas-Volumenstrom kleiner als 5 Liter pro Minute bei sehr geringem Druck sein kann.

[0019] Die während des Materialabtrags auftretenden gas- bzw. plasmodynamischen Prozesse können dadurch zusätzlich unterstützt werden, dass an der der Strahleinkoppelseite gegenüberliegenden Rückseite des Werkstücks ein Unterdruck angelegt wird. Durch diese Maßnahme werden in der Mikrobohrung befindliche Gase oder Materie, die Strahlleistung absorbieren, zur Rückseite des Bohrlochs hin abgesaugt, wodurch eine gute Energieeinkopplung in den am Ende der Mikrobohrung befindlichen Bohrlochbereich ermöglicht wird.

[0020] Nachfolgend sind Ausführungsbeispiele der Erfindung anhand der Zeichnung näher erläutert. Es zeigen zum Teil stärker schematisiert:

[0021] Fig. 1 eine Seitenansicht einer Lasermaterialbearbeitungsanlage zum Herstellen vom Mikrobohrungen,
[0022] Fig. 2 eine Teilaufsicht auf die in Fig. 1 gezeigte Lasermaterialbearbeitungsanlage,

[0023] Fig. 3 einen Längsschnitt durch ein mit einem Laserstrahl in das Werkstück eingebrachtes Bohrloch während der Glättung der Bohrlochwand mit dem Laserstrahl, wobei strichliert auch die Bahnkurve des Fokuspunktes des Laserstrahls dargestellt ist und

[0024] Fig. 4 bis 7 eine grafische Darstellung einer die Form einer Schraubenlinie oder einer verallgemeinerten Schraubenlinie aufweisenden Bahnkurve des Laserstrahl-Fokuspunkts in einem kartesischen Koordinatensystem.

[0025] Eine im ganzen mit 1 bezeichnete Vorrichtung zum Einbringen einer Mikrobohrung 2 in ein Werkstück 3 weist einen Laser 4 zum Erzeugen eines Laserstrahls 5 auf. Der Laser 4 ist als hochrepetierender Kurzpuls-Laser mit einer

Pulswiederholrate von etwa 10 Kilohertz bei einer Pulsdauer von weniger als 20 Nanosekunden ausgebildet. Bei dem Laser handelt es sich vorzugsweise um einen Nd:YAG-Laser. Das Verfahren ist aber auch anwendbar für alle anderen Laser (z. B. solche mit kürzerer Pulsdauer und/oder kürzerer Wellenlänge).

[0026] Ausgehend von dem Laser **4** zum Werkstück sind im Strahlengang des Laserstrahls **5** eine Shutter **6**, ein Polarisationsmanipulator **7**, eine optische Z-Achse **8**, ein Galvanometer-Ablenkspiegel **9** und eine telezentrische Fokussierlinse **10** angeordnet. Mit Hilfe der Fokussierlinse **10** ist der Laserstrahl **5** im Bereich des Werkstücks **3** fokussierbar. Mittels der optischen Z-Achse **8** ist der Fokuspunkt **11** in Erstreckungsrichtung des Laserstrahls **5** relativ zu dem Werkstück **3** verstellbar. Der Galvanometer-Ablenkspiegel **9** und die telezentrische Fokussierlinse **10** ermöglichen eine Parallelverschiebung des Laserstrahls in X- und Y-Richtung. Mittels der Vorrichtung **1** lässt sich der Fokuspunkt **11** entlang einer frei definierbaren dreidimensionalen Bahnkurve **12** relativ zu dem Werkstück **3** positionieren.

[0027] Zur Ansteuerung des Ablenkspiegels **9** und der Fokussierlinse **10** ist eine Steuereinrichtung **13** vorgesehen, die mit Positionierantrieben des Ablenkspiegels **9** und der Fokussierlinse **10** in Steuerverbindung steht. In der Steuereinrichtung **13** ist die Bahnkurve für den Fokuspunkt **11** gespeichert. Das Werkstück **3** ist mittels einer Positioniereinrichtung **14** in X- und Y-Richtung relativ zu dem Laserstrahl **5** bewegbar.

[0028] In Fig. 1 ist erkennbar, dass das Werkstück **3**, der Laser **4**, der Shutter **6**, der Ablenkspiegel **9**, der Polarisationsmanipulator **7**, die Fokussierlinse **10** und die Positioniereinrichtung **14** auf einem Granitblock **15** angeordnet sind, der auf einem auf dem Erdboden aufgestellten Trägergestell **16** ruht. Der Granitblock **15** ist über elastische Lager mit dem Trägergestell **16** verbunden.

[0029] Zum Herstellen der Mikrobohrung **2** wird der Laserstrahl **5** im Bereich des Werkstücks **3** fokussiert, wobei der Fokuspunkt **11** zum Abtragen von innerhalb einer zu erzeugenden Bohrlochkontur **17** befindlichem Werkstückmaterial innerhalb der Bohrlochkontur **17** umlaufend bewegt wird. Während des Materialabtrags wird der Fokuspunkt **11** gleichzeitig in der durch den Pfeil Pf markierten Durchtritts- oder Z-Richtung verschoben.

[0030] Bei dem Ausführungsbeispiel nach Fig. 4 wird der Fokuspunkt **11** zum Herstellen einer zylindrischen Mikrobohrung entlang einer im Wesentlichen schraubenlinienförmigen Bahnkurve **12** relativ zu dem Werkstück **3** bewegt. Zu Beginn der Bearbeitung wird der Laserstrahl **5** durch öffnen des Shutters **6** auf das Werkstück projiziert, wobei die Steuereinrichtung **13** den Ablenkspiegel **9** und die telezentrische Fokussierlinse **10** derart ansteuert, dass der Fokuspunkt **11** an der der Fokussierlinse **10** zugewandten Werkstückoberfläche **18** positioniert ist. Danach wird der Fokuspunkt **11** entlang der schraubenlinienförmigen Bahnkurve **12** in das Werkstück bewegt, bis er die gegenüberliegende rückseitige Werkstückoberfläche **19** erreicht.

[0031] Der Durchmesser des Zylinders, in dessen Mantelfläche die Bahnkurve **12** verläuft, ist etwa um den Durchmesser des Fokuspunkts **11** oder des Fokusflecks kleiner gewählt als der Durchmesser der herzustellenden Mikrobohrung **2**. Während des Vorschubs des Fokuspunkts **11** wird mittels des Laserstrahls **5** innerhalb der zu erzeugenden Bohrlochkontur befindliches Werkstückmaterial von dem Werkstück **3** abgetragen. In Fig. 4 ist erkennbar, dass der Z-Abstand zueinander benachbarter Windungen der schraubenlinienförmigen Bahnkurve **12** über die gesamte Länge der Mikrobohrung **2** konstant ist. Beim Einbringen einer Mikrobohrung in einen homogenen Werkstoff wird die Ge-

schwindigkeit, mit welcher der Fokuspunkt **11** entlang der Bahnkurve **12** bewegt wird, konstant eingestellt. Zum Bearbeiten eines Gradientenmaterials kann die Bahngeschwindigkeit des Fokuspunkts **11** entlang der Bahnkurve **12** verändert werden. Es werden typische Bearbeitungszeiten von circa 20 Sekunden für ein Rundloch mit einem Durchmesser von etwa 50 Mikrometern erreicht.

[0032] Bei dem Ausführungsbeispiel nach Fig. 5 wird der Fokuspunkt **11** zum Herstellen einer zylindrischen Mikrobohrung **2** entlang einer Bahnkurve **12** bewegt, die in einem Anfangsabschnitt der herzustellenden Mikrobohrung **2** einen ersten Bahnkurvenabschnitt **12a** aufweist, der schraubenlinienförmig in der Mantelfläche eines einen ersten Durchmesser aufweisenden, koaxial zur Längsachse der herzustellenden Mikrobohrung **2** angeordneten ersten Zylinders verläuft. An diesen ersten Bahnkurvenabschnitt **12a** schließt sich ein zweiter, etwa in einer Kegelmantelfläche verlaufender etwa spiralförmiger Bahnkurvenabschnitt **12b** an, in dem sich der Durchmesser oder die Querschnittsabmessung der Bahnkurve **12** bzw. der Umlaufbewegung des Fokuspunkts **11** erweitert. In einem sich an diesen Bahnkurvenabschnitt **12b** anschließenden dritten Bahnkurvenabschnitt **12c** verläuft die Bahnkurve **12** schraubenlinienförmig in der Mantelfläche eines zweiten Zylinders, der zu dem ersten Zylinder konzentrisch angeordnet ist und einen größeren Durchmesser aufweist als der erste Zylinder. Der Durchmesser des zweiten Zylinders ist etwa um den Durchmesser des Fokuspunkts **11** kleiner gewählt als der Durchmesser der herzustellenden Mikrobohrung **2**. Bei dem Ausführungsbeispiel nach Fig. 5 wird also der Durchmesser der Bahnkurve **12** oder der Umlaufbewegung des Fokuspunkts **11** in Abhängigkeit von dem Bohrfortschritt verändert.

[0033] Bei dem in Fig. 6 gezeigten Ausführungsbeispiel zum Herstellen einer einen trichter- oder konusförmigen Bohrungsabschnitt aufweisenden Mikrobohrung **2** wird wie bei dem Ausführungsbeispiel nach Fig. 5 in einem Anfangsabschnitt der Mikrobohrung **2** der Durchmesser der Bahnkurve **12** des Fokuspunkts **11**, ausgehend von einem innerhalb der zu erzeugenden Bohrlochkontur **17** befindlichen und von dieser bestandenen Anfangspunkt **20**, zunächst vergrößert, um so den Wärmeeintrag in eine der fertigen Bohrlochwand nahe Materialzone zu minimieren. Der entsprechende Bahnkurvenabschnitt ist in Fig. 6 mit **12a** bezeichnet. Dabei wird der Fokuspunkt zunächst spiralförmig in der Oberflächenebene des Werkstücks **3** bewegt und danach zusätzlich in Z-Richtung relativ zu dem Werkstück **3** verschoben.

[0034] In einem sich daran anschließenden Bohrungsabschnitt wird der Fokuspunkt **11** entlang eines sich in einer Kegelmantelfläche spiralförmig erstreckenden Bahnkurvenabschnitts **12b** bewegt. Dabei nimmt der Durchmesser der Umlaufbewegung des Fokuspunkts in der durch den Pfeil Pf markierten Durchtrittsrichtung der Mikrobohrung **2** stetig ab.

[0035] In einem darauffolgenden dritten Bahnkurvenabschnitt **12c** verläuft die Bahnkurve **12** schraubenlinienförmig in der Mantelfläche eines zu der Kegelmantelfläche des zweiten Bahnkurvenabschnitts koaxialen Zylinders. Nach dem Durchlaufen dieser Zylindermantelfläche wird der Fokuspunkt **11** spiralförmig zur Achse des Zylinders bewegt, wo der Laserstrahl **5** an einem Endpunkt **21** abgeschaltet wird.

[0036] Bei dem Ausführungsbeispiel nach Fig. 7 wird eine Mikrobohrung mit einem Freiformquerschnitt hergestellt. Dabei wird die Durchtrittsrichtung der zu erzeugenden Mikrobohrung **2** weisende Geschwindigkeitskomponente der Relativgeschwindigkeit zwischen Fokuspunkt **11** und Werkstück **3** in Abhängigkeit von dem Bohrfortschritt

verändert. In **Fig. 7** ist deutlich erkennbar, dass zueinander benachbarte Windungen der Bahnkurve **12** in einem Anfangs- und einem Endabschnitt der zu erzeugenden Mikrobohrung **2** in Durchtrittsrichtung **Pf** jeweils einen kleineren Abstand aufweisen, als in einem dazwischen befindlichen Abschnitt der Mikrobohrung **2**. Wie bei dem Ausführungsbeispiel nach **Fig. 6** verläuft der Anfangsbereich der Bahnkurve **12**, ausgehend von einem Anfangspunkt **20** spiralförmig nach außen, während der Endbereich der Bahnkurve **12** spiralförmig nach innen zu einem Endpunkt **21** verläuft.

[0037] Die Herstellung der Mikrobohrung **2** erfolgt vorzugsweise in zwei Bearbeitungsschritten, wobei in einem ersten Bearbeitungsschritt eine Schrubbearbeitung durchgeführt wird, bei der die zu erzeugende Kontur der Mikrobohrung **2** im wesentlichen hergestellt wird. Dabei wird die Bearbeitungsgeschwindigkeit auf maximalen Vorschub ausgelegt. In einem zweiten Bearbeitungsschritt wird eine Schlichtbearbeitung durchgeführt, bei der die Innenwand der Mikrobohrung **2** geglättet wird. Bei dem Schlichtbearbeitungsschritt beträgt die Relativgeschwindigkeit zwischen Fokuspunkt **11** und Werkstück **3** das fünf bis zehnfache der Relativgeschwindigkeit zwischen Fokuspunkt **11** und Werkstück **3** in dem Schrubbearbeitungsschritt. In dem Schlichtbearbeitungsschritt wird die Bahnkurve **12** in entgegengesetzter Richtung durchlaufen wie in dem Schrubbearbeitungsschritt.

[0038] Mittels des Polarisationsmanipulators **12** kann die Lage der Polarisationsebene des Laserstrahls **5** relativ zu dem Werkstück **3** entlang der Bahnkurve **12** des Fokuspunkts **11** jeweils etwa rechtwinklig zur Tangente an die Bahnkurve **12** in der jeweiligen Bearbeitungsstelle orientiert werden, um eine gute Energieeinkopplung in das Werkstück **3** zu erreichen.

[0039] Bei dem Verfahren zum Herstellen einer Mikrobohrung wird ein Laserstrahl im Bereich eines Werkstücks fokussiert. Zum Abtragen von innerhalb einer zu erzeugenden Bohrlochkontur befindlichem Werkstückmaterial werden der Fokuspunkt relativ zueinander bewegt. Dabei läuft der Fokuspunkt innerhalb der Bohrlochkontur oder deren gerader Verlängerung um, wobei er zusätzlich in und/oder entgegen der Durchtrittsrichtung der zu erzeugenden Mikrobohrung relativ zu dem Werkstück bewegt wird.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Herstellen einer Mikrobohrung **(2)**, wobei ein Laserstrahl **(5)** im Bereich eines Werkstücks **(3)** fokussiert und der Fokuspunkt **(11)** zum Abtragen von innerhalb einer zu erzeugenden Bohrlochkontur **(17)** befindlichem Werkstückmaterial innerhalb der Bohrlochkontur **(17)** oder deren gerader Verlängerung umlaufend bewegt wird, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Fokuspunkt **(11)** und das Werkstück **(3)** während des Materialabtrags zusätzlich zu der Umlaufbewegung in und/oder entgegen der Durchtrittsrichtung **(Pf)** der zu erzeugenden Mikrobohrung **(2)** relativ zueinander bewegt werden.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der Fokuspunkt **(11)** während des Materialabtrags entlang einer schraubenlinienförmigen Bahnkurve **(12)** bewegt wird.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die in Durchtrittsrichtung **(Pf)** der zu erzeugenden Mikrobohrung **(2)** weisende Geschwindigkeitskomponente der Relativgeschwindigkeit zwischen Fokuspunkt **(11)** und Werkstück **(3)** zumindest in einem Abschnitt der zu erzeugenden Mikrobohrung **(2)** konstant gehalten wird.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass die in Durchtrittsrichtung **(Pf)** der zu erzeugenden Mikrobohrung weisende Geschwindigkeitskomponente der Relativgeschwindigkeit zwischen Fokuspunkt **(11)** und Werkstück **(3)** in Abhängigkeit von dem Bohrfortschritt verändert wird und insbesondere in einem Anfangs- und/oder Endabschnitt der zu erzeugenden Mikrobohrung **(2)** kleiner gewählt wird als in einem dazwischen befindlichen Abschnitt der Mikrobohrung **(2)**.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass der Durchmesser oder wenigstens eine Querschnittsabmessung der Umlaufbewegung des Fokuspunkts **(11)** in Abhängigkeit von dem Bohrfortschritt verändert wird und dass vorzugsweise in einem Anfangsabschnitt der Mikrobohrung **(2)** der Durchmesser oder die wenigstens eine Querschnittsabmessung kleiner gewählt wird als in einem sich an den Anfangsabschnitt anschließenden Abschnitt der Mikrobohrung **(2)**.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass der Durchmesser oder wenigstens eine Querschnittsabmessung der Umlaufbewegung des Fokuspunkts **(11)** in einem vorzugsweise am Anfang der zu erzeugenden Mikrobohrung **(2)** angeordneten Bohrlochabschnitt mit zunehmendem Bohrfortschritt reduziert wird, vorzugsweise derart, dass die Bahnkurve **(12)** entlang welcher der Fokuspunkt **(11)** bewegt wird, in einer trichter- oder konusförmigen Fläche verläuft.

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass in einem Schrubb-Bearbeitungsschritt die zu erzeugende Bohrlochkontur **(17)** im wesentlichen hergestellt wird, dass danach in einem Schlicht-Bearbeitungsschritt die Innenwand der Mikrobohrung **(17)** geglättet wird, und dass in dem Schlicht-Bearbeitungsschritt die Relativgeschwindigkeit zwischen Fokuspunkt **(11)** und Werkstück **(3)** vorzugsweise größer gewählt wird als in dem Schrubb-Bearbeitungsschritt.

8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass in dem Schlicht-Bearbeitungsschritt der Drehsinn der Umlaufbewegung des Fokuspunkts **(11)** entgegengesetzt zum Drehsinn der Umlaufbewegung bei dem Schrubb-Bearbeitungsschritt gewählt wird.

9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass der Fokuspunkt **(11)** zu Beginn der Bearbeitung innerhalb der zu erzeugenden Bohrlochkontur **(17)** oder deren gerader Verlängerung mit seitlichem Abstand dazu vorzugsweise etwa mittig zu der zu erzeugenden Mikrobohrung **(2)** positioniert wird, bis Material von dem Werkstück **(3)** abgetragen wird, dass danach der seitliche Abstand zwischen der Bohrlochkontur **(17)** oder deren gerader Verlängerung durch eine Relativbewegung zwischen Fokuspunkt **(11)** und Werkstück **(3)** reduziert wird und dass dann die zu erzeugende Bohrlochkontur **(17)** im wesentlichen hergestellt wird.

10. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, dass der Laserstrahl **(5)** zum Erzeugen der Umlaufbewegung des Fokuspunkts **(11)** quer zu seiner Längserstreckung parallel verschoben wird und dabei vorzugsweise rechtwinklig zur strahl-einfallsseitigen Oberfläche des Werkstücks **(3)** auf dieses auftrifft.

11. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 10, dadurch gekennzeichnet, dass zum Herstellen der Mikro-

bohrung (2) wenigstens zwei seitlich aneinander an-
grenzende oder sich seitlich bereichsweise überdek-
kende Teilbohrlöcher in das Werkstück (3) eingebracht
werden, und dass dazu jeweils der Fokuspunkt (11) in-
nerhalb der Bohrlochkontur des betreffenden, zu erzeu-
genden Teilbohrlochs oder dessen gerader Verlänge-
rung umlaufend und zusätzlich in und/oder entgegen
der Durchtrittsrichtung (Pf) des zu erzeugenden Teil-
bohrlochs relativ zueinander bewegt werden.

12. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 11, da-
durch gekennzeichnet, dass die Strahlleistung des La-
serstrahls (5) in Abhängigkeit von dem Bohrfortschritt
verändert wird und dass vorzugsweise in einem An-
fangs- und/oder Endabschnitt der zu erzeugenden Mi-
krobohrung (2) eine größere Strahlleistung gewählt 15
wird als in einem dazwischen befindlichen Abschnitt
der Mikrobohrung (2).

13. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 12, da-
durch gekennzeichnet, dass der Laserstrahl (5) im we-
sentlichen in einer Ebene polarisiert ist, und dass die 20
Lage dieser Polarisationsebene relativ zu dem Werk-
stück (3) entlang der Bahnkurve (12) des Fokuspunkts
verändert wird, vorzugsweise derart, dass die Polarisa-
tionsebene jeweils etwa rechtwinklig zur Tangente an
die Bahnkurve (12) in der jeweiligen Bearbeitungs- 25
stelle verläuft.

14. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 13, da-
durch gekennzeichnet, dass im Bereich der zu erzeu-
genden Mikrobohrung (2) während des Materialab-
trags von dem Werkstück (3) ein Hilfsgasstrom vor- 30
zugsweise quer zur Durchtrittsrichtung (Pf) der zu er-
zeugenden Mikrobohrung (2) zugeführt wird.

15. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 14, da-
durch gekennzeichnet, dass während des Materialab-
trags an der der Strahleinkoppelseite gegenüberliegen- 35
den Rückseite des Werkstücks (3) ein Unterdruck an-
gelegt wird.

Hierzu 7 Seite(n) Zeichnungen

- Leerseite -

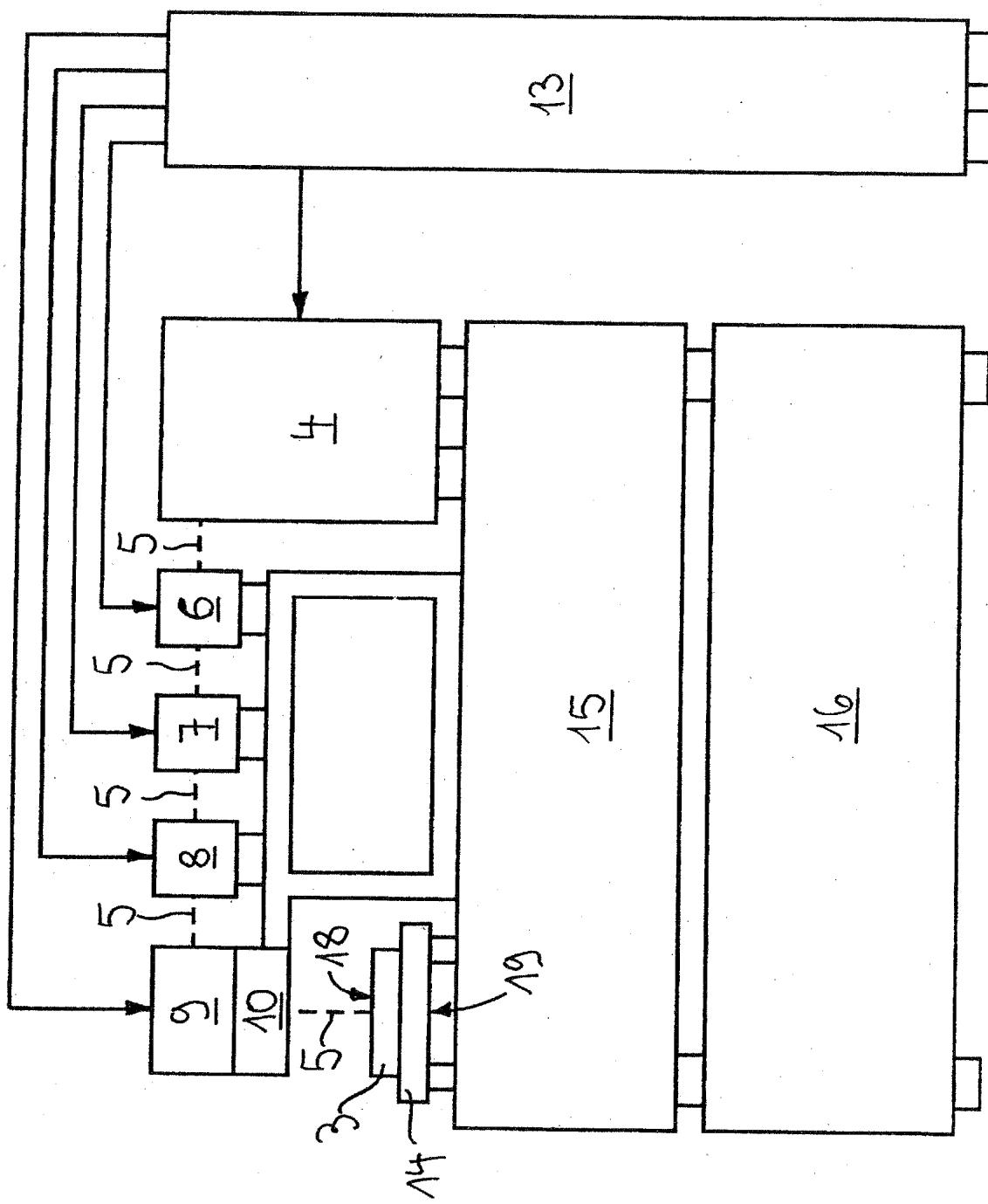


Fig. 1

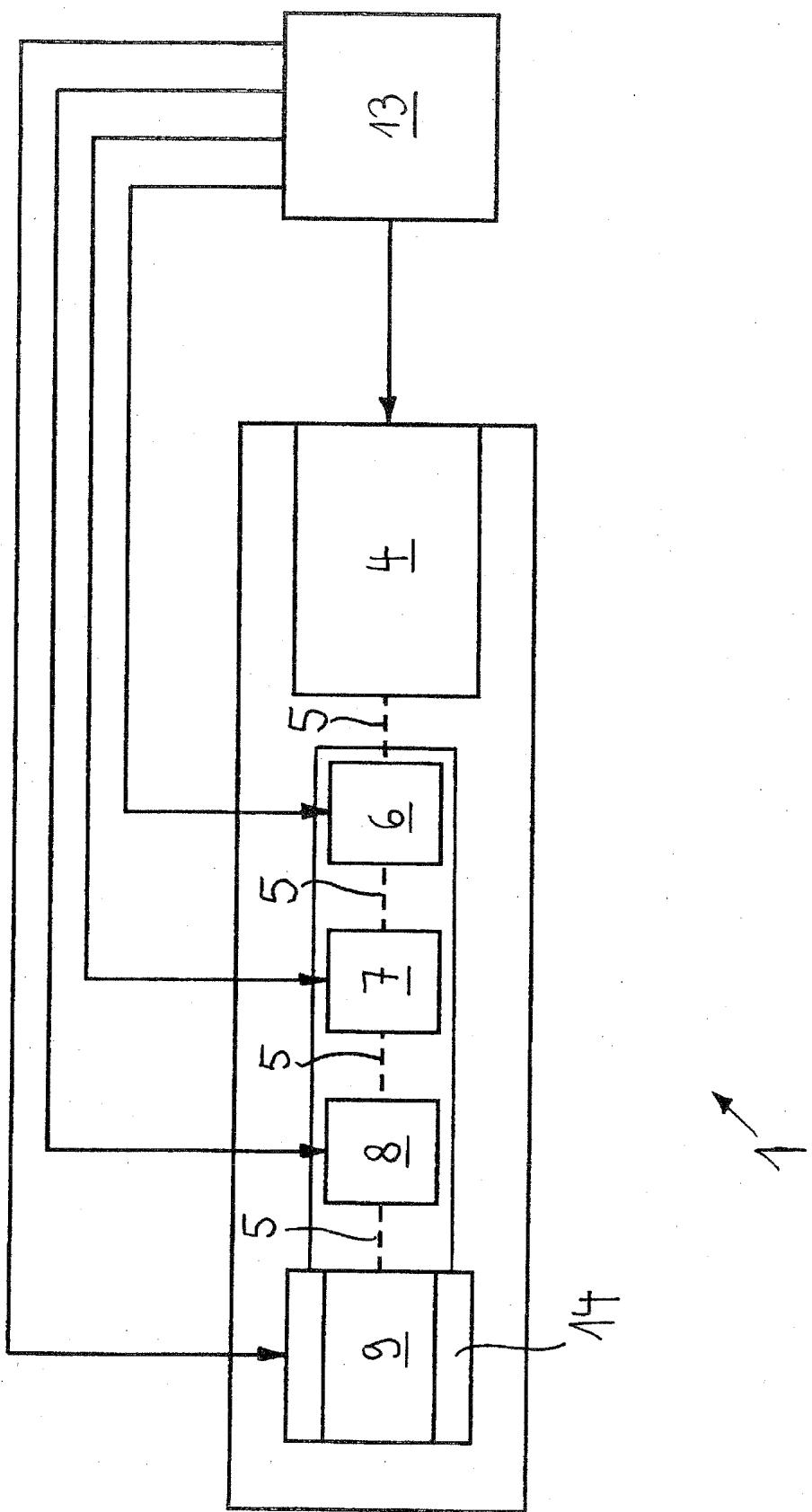


Fig. 2

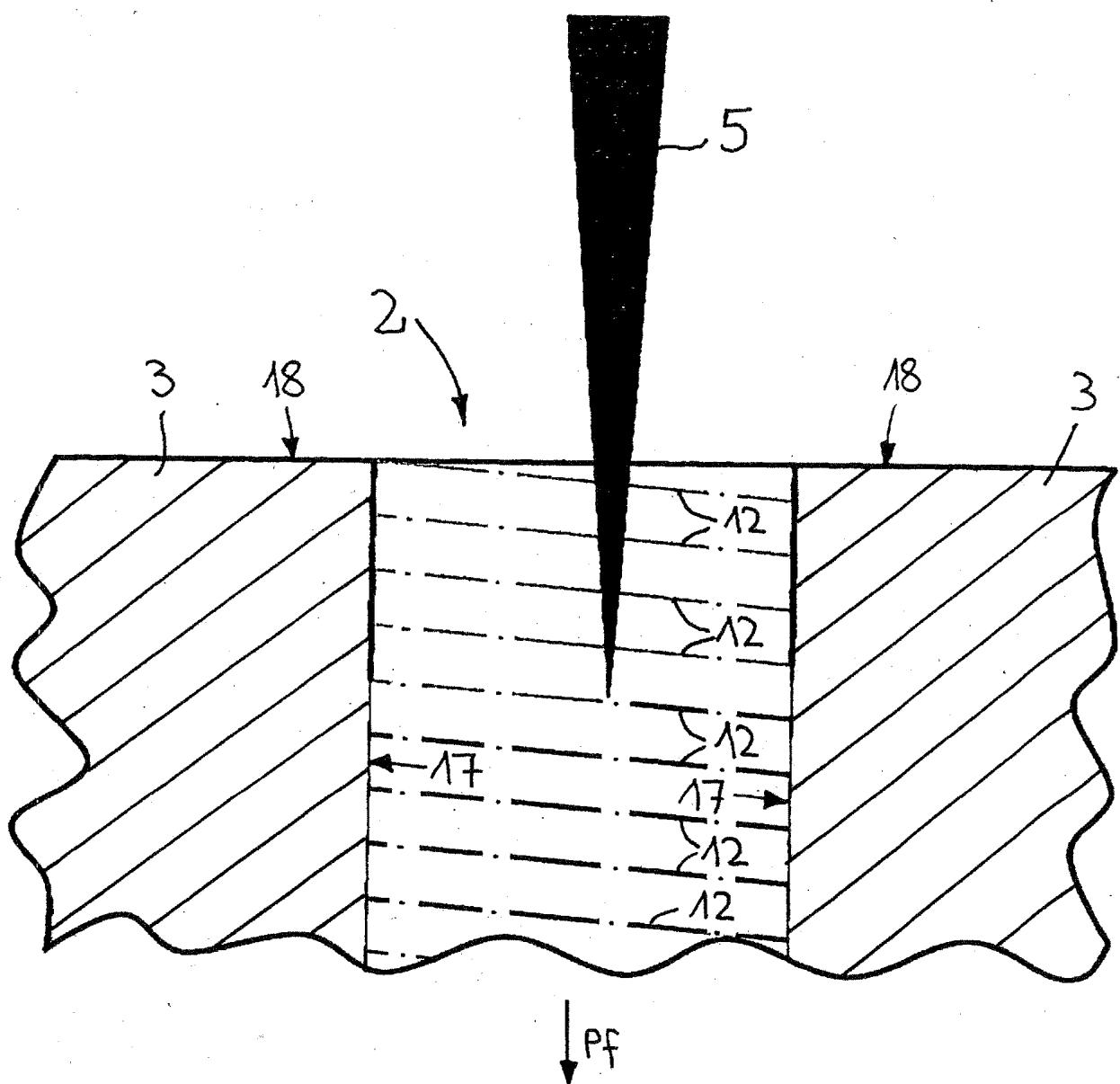


Fig. 3

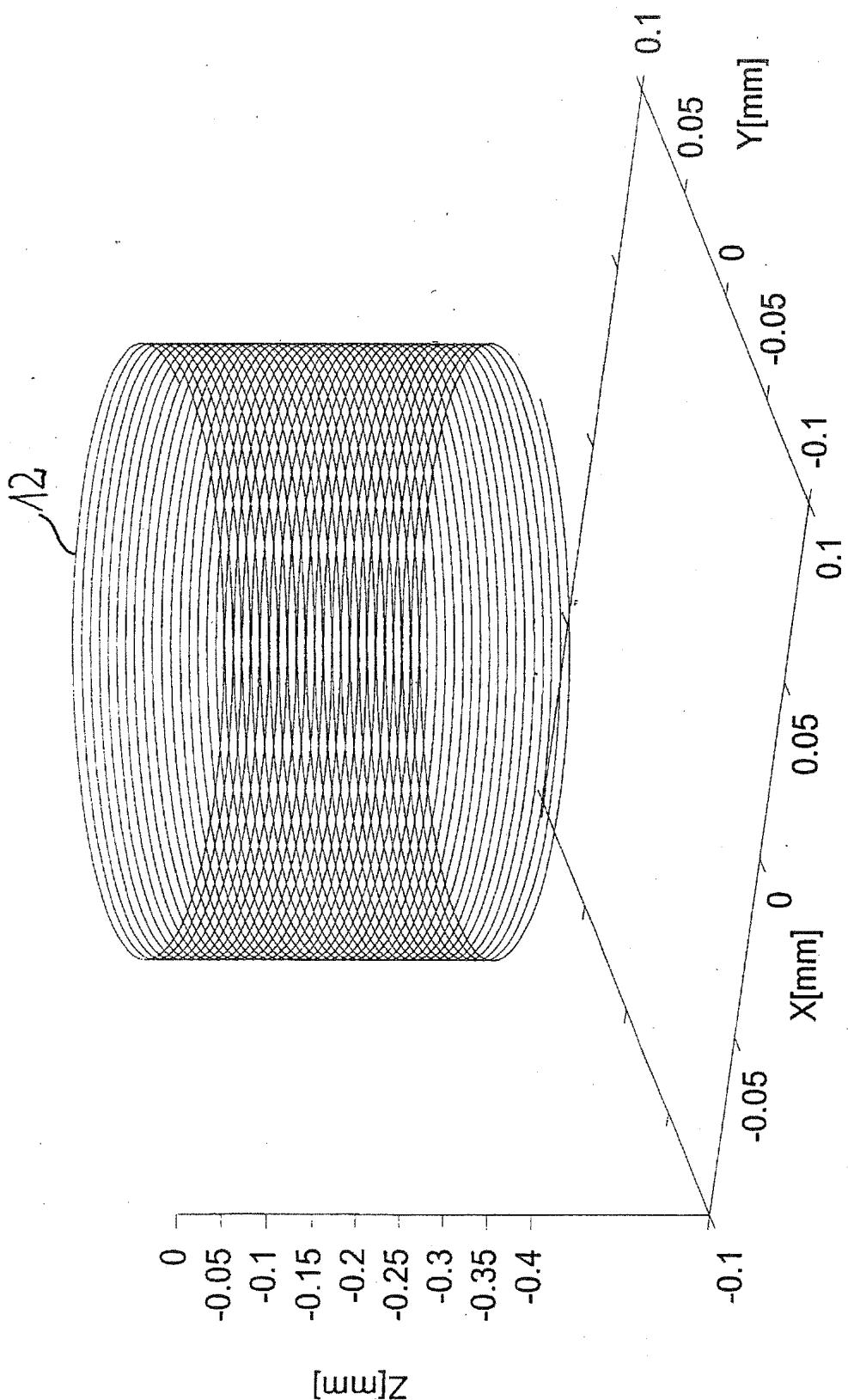


Fig. 4

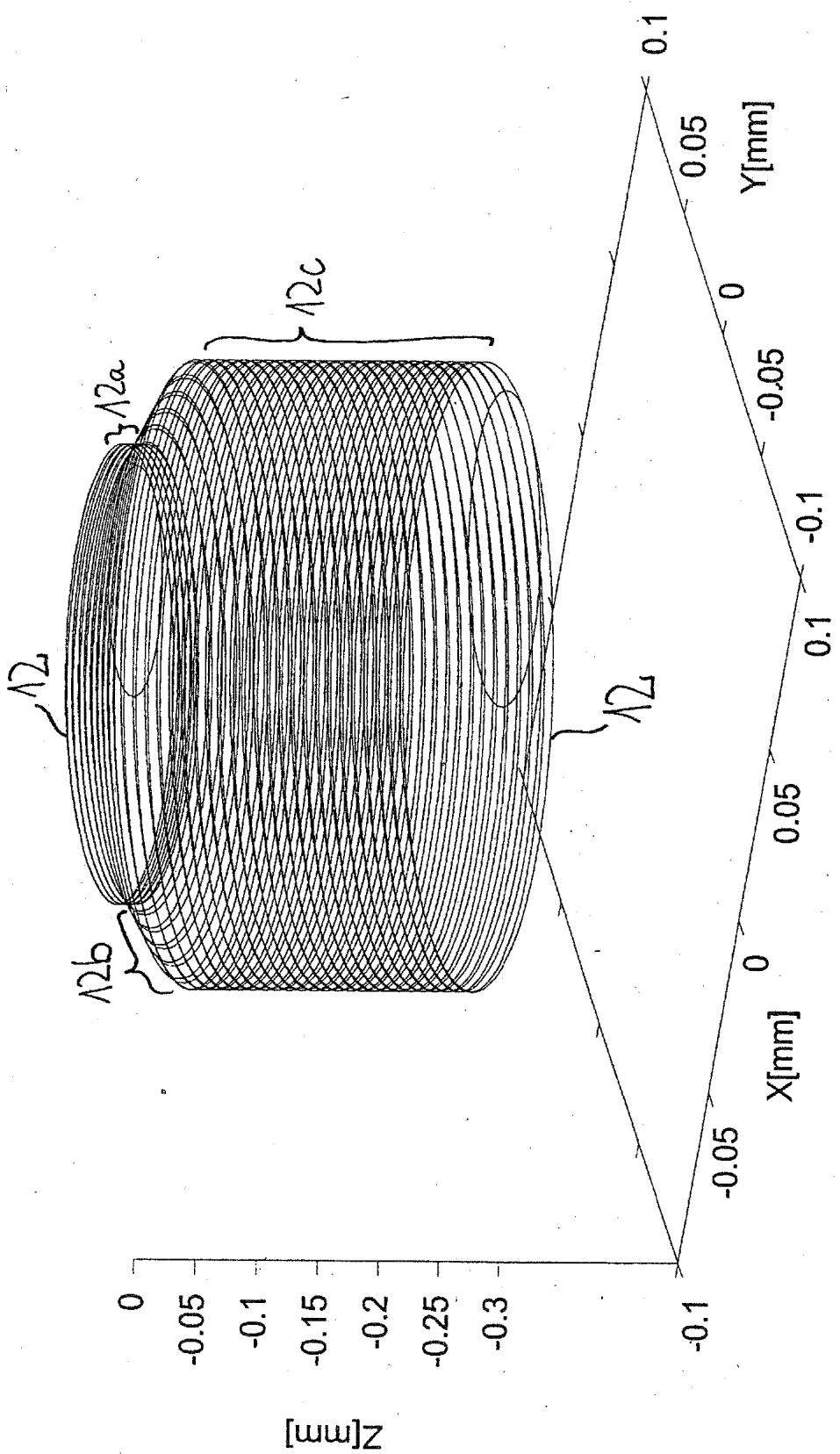


Fig. 5

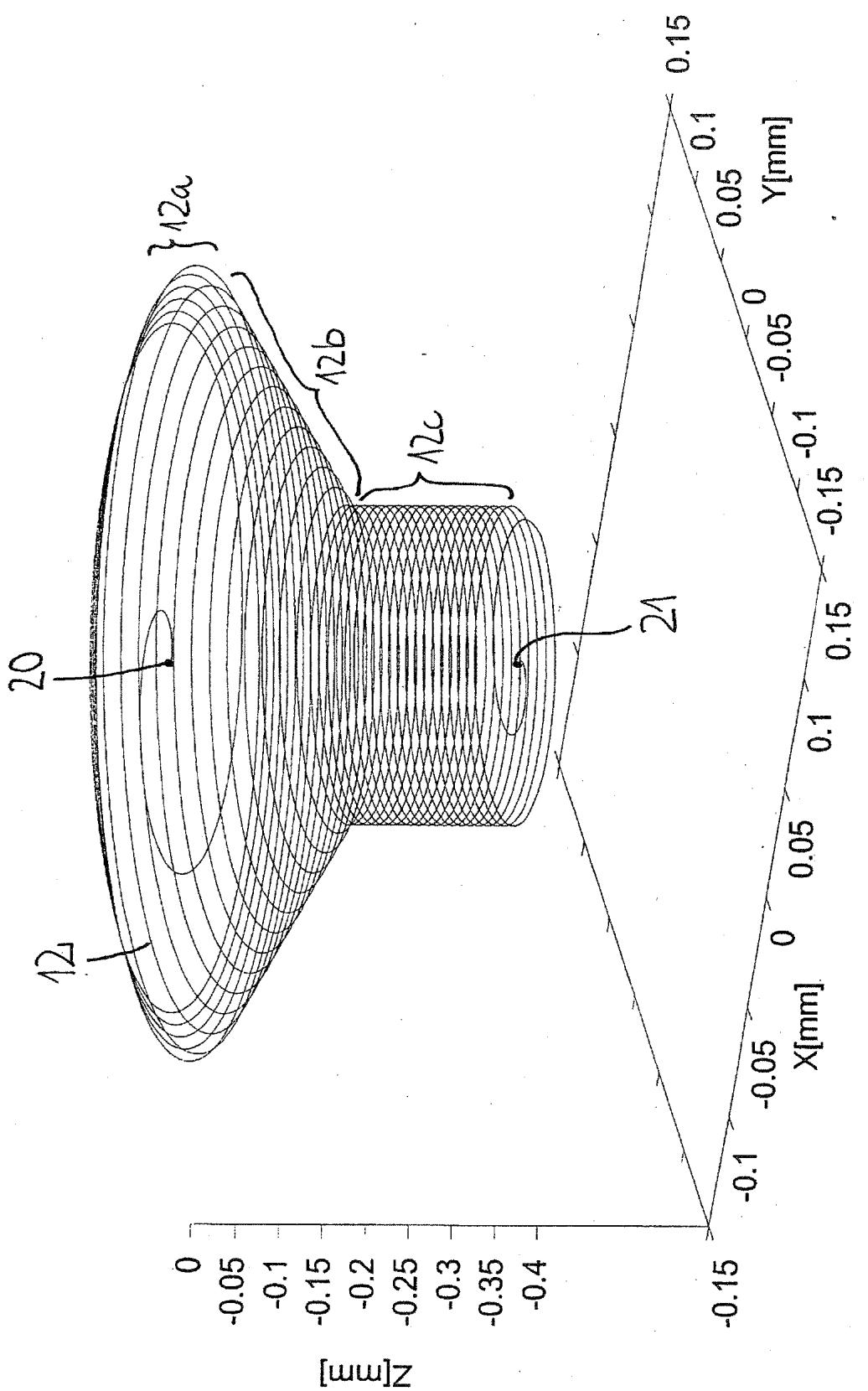


Fig. 6

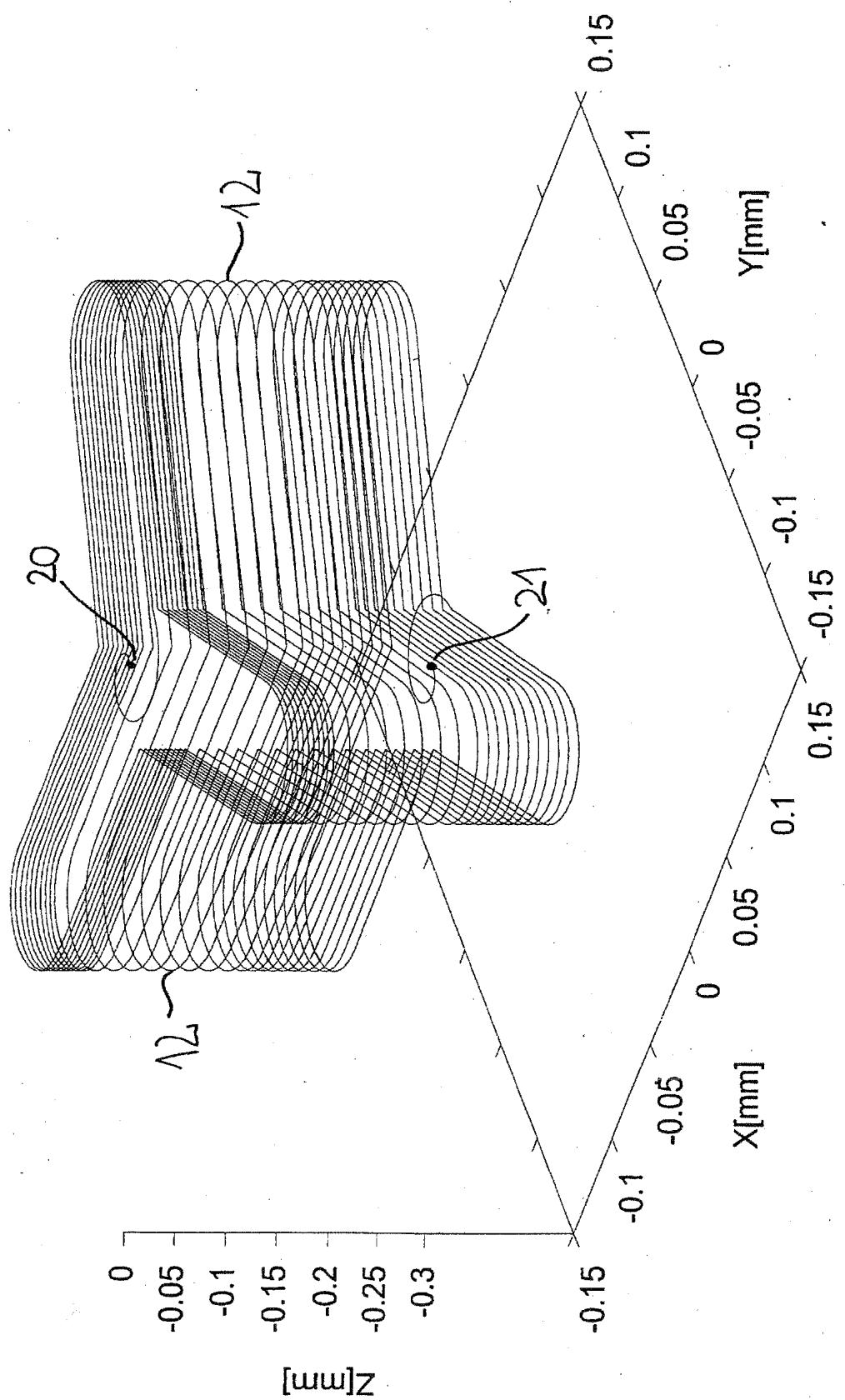


Fig. 7